

# 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용한 지르칼로이-4 용접특성 조사

한국원자력연구소 김수성, 김덕현, 김철중

## 1. 서론

최근 Nd:YAG 레이저 용접법은 레이저 빔의 융통성과 취급이 용이하여 자동조절이 가능하며 대량 생산체제를 갖추게 됨에 따라 생산성을 높일 수 있으므로 모든 산업분야에서 광범위하게 응용되고 있으며, 특히 원자력 산업분야에서도 핵연료 제조관련 정밀용접에서 매우 유용하게 사용되고 있다. 즉 핵연료 제조에서는 지르칼로이-4의 용접, 피복관의 He 가스 밀봉용접, 온도측정을 위한 Ti 열전대용접 그리고 여러가지 특수부품의 정밀용접등 다양하게 활용되고 있다.

본 연구는 최대 평균출력 200 Watt 급인 Nd:YAG 레이저를 사용하여 현재 핵연료 제조에 사용되고 있는 지르칼로이-4 판재를 시편으로 하여 레이저 용접시 파워밀도에 따른 용입상태를 분석하였으며, 레이저 용접과 GTA 용접의 인장강도, 각각의 용접 파단면, 경도 분포, 그리고 미세조직을 비교 조사하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용된 지르칼로이-4 시편은 압연된 것으로 1.0 mm 두께의 얇은 판이며, 시편의 크기를 폭 30 mm, 길이 80 mm 되도록 절단하고, 절단된 시편을 아세톤으로 세척한 다음 초음파 및 벅금처리한 후 실험에 사용하였다.

레이저 용접시 대기중의 오염이나 산화를 방지하기 위하여 아르곤

가스 ( 99.995 % ) 를 사용하였으며, 이때의 아르곤 가스의 유량은 레이저가 조사되는 시편의 앞면부분과 뒷면부분에서 모두 30 l/min. 로 하였다.

실험에 사용된 조명장치는 CCD 카메라와 할로겐 램프의 빛이 통하게끔 cold mirror 와 hot mirror 를 사용하였으며, 집광렌즈는 achromatic doublet 으로 초점거리가 100 mm 이고, 집광위치는 He - Ne 레이저를 집광렌즈를 통하여 시편에 맺히게 하고 CCD 모니터를 통하여 He - Ne 레이저의 초점크기가 최소점으로 하였다.

### 3. 실험결과

Fig. 1 은 레이저 용접시 파워밀도에 따라서 효과적인 에너지 전달을 위하여 필요한 레이저 펄스에너지를 나타낸 것이다. 여기서 파워밀도가 0.8 MW/cm<sup>2</sup>, 레이저 펄스에너지 10 J 부근에서 충분히 용입되기 시작하였으며, 파워밀도가 낮을 수록 용입에 필요한 레이저 펄스에너지는 증가한다. Fig. 1 의 A 는 재료표면에서 커다란 불꽃기둥과 같이 보이는 금속증기 발생구역이며, B 는 재료표면에서 강한 빛을 가진 열 에너지에 의해 용접되는 구역을 나타낸다.

Fig. 2 에서는 레이저 파워밀도에 따른 지르칼로이-4 판재의 용입상태를 나타낸 것이다. 파워밀도 0.5 MW/cm<sup>2</sup> 일 경우는 충분한 에너지를 전달되지 않아서 재료표면의 반사에 의해 흡수에너지가 작아져 두께 1.0 mm 의 지르칼로이-4 판재를 0.5 mm 정도의 용입이 일어났으며, 반면에 파워밀도 3.0 MW/cm<sup>2</sup> 일 경우는 충분한 레이저 에너지가 재료표면에 형성되면서 흡수하게 되어 1.0 mm 두께를 완전히 관통하였음을 보여주고 있다.

지르칼로이-4 판재의 인장강도의 조사에서는 레이저 및 GTA 용접부의 인장강도는 대체로 모재보다 높았으며, 그반면에 용접부의 연성은 모재보다 낮은 경향을 나타내고 있다. 특히 GTA 용접시편은 레이저 용접시편보다 인장치가 높으며 연신율은 레이저 용접시편이 높은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 3 은 인장시험후 레이저로 용접된 시편과 GTA 용접된 시편의 파괴형태를 microvoid coalescence 로 관찰된 것으로, 시편 모두가 딥플를 이루고 있는 연성파괴를 보여주고 있다. 특히 레이저 용접금속의 파단면은 Fig. 3 ( A ) 와 같이 GTAW 와 모재의 파단면에 비하여 아주 미세한 하부구조 ( fine substructure ) 의 형태를 이루고 있다.

GTAA 용접의 WM 조직은 prior  $\beta$ - grain 이 크게 성장한  $\beta$ -quenched 조직을 가졌으며, Fig. 4 와 같이 레이저 용접의 WM 조직은 급열, 급냉으로 인하여 용접열사이클을 가지므로 prior  $\beta$ - grain 크기가 비교적 작게 나타났다.

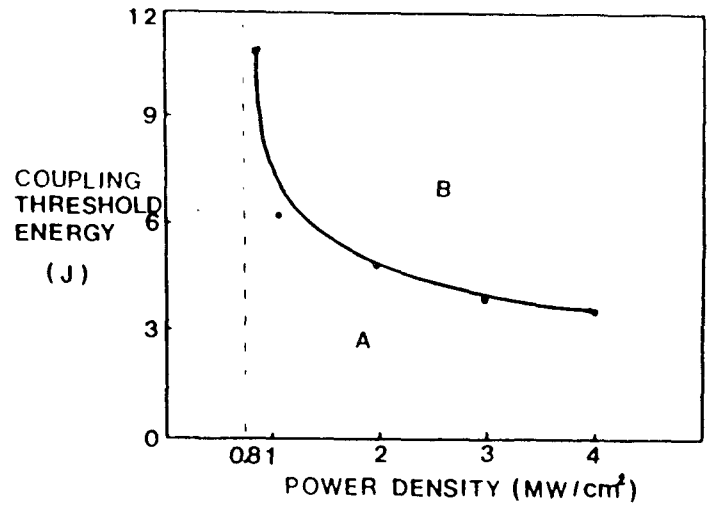


Fig. 1 Coupling threshold energy vs. power density

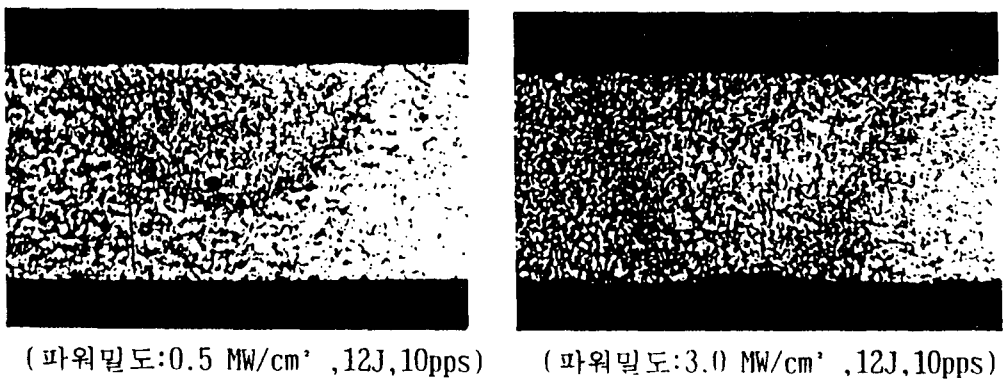


Fig. 2 Variations of penetration depth vs. power density ( X 50 )

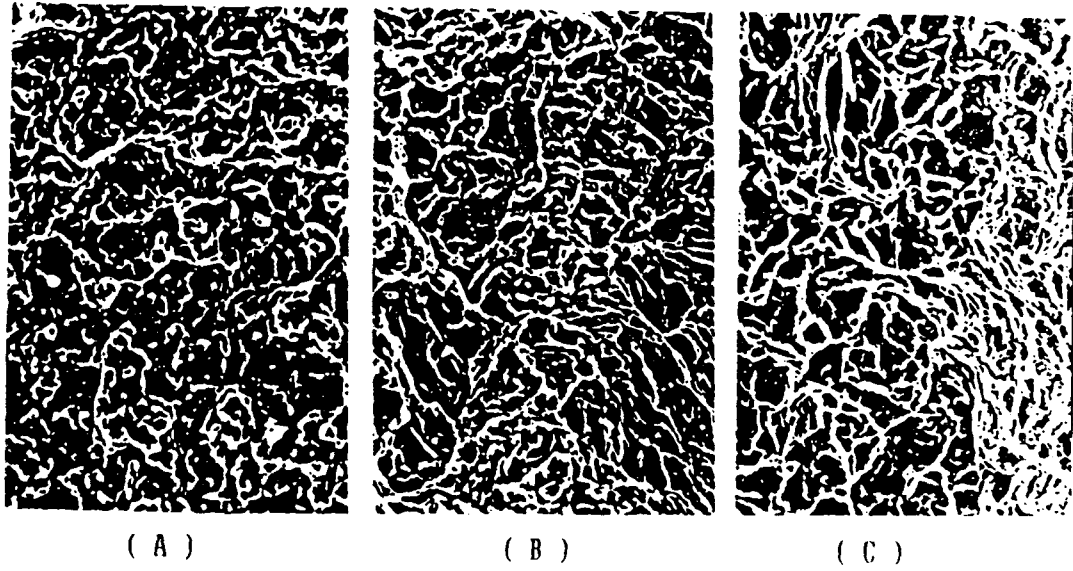


Fig. 3 Fractography of laser welded (A), GTA welded (B) and unwelded specimen (C) ( X 1000 )



Fig. 4 Microstructure of LB welded Zr-4 specimens ( X 200 )